

# Estudio de caso sobre la degradación del hormigón armado sometido a elevadas temperaturas durante un incendio

**Yan Carlos Chiu-Rodríguez y Francisco Corvo-Pérez.**

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Ministerio de la Construcción, Ave. 35 y Carlos Manuel de Céspedes, Plaza de la Revolución, La Habana. \*Grupo de Investigación de la Corrosión de la Universidad de Campeche, México. yan.carlos@enialabh.cu. corvo@imre.co.cu.

Recibido: 15 de julio de 2011.

Aceptado: 23 de abril de 2012.

Palabras clave: hormigón armado, elevadas temperaturas, degradación del hormigón.

Key words: reinforced concrete, high temperatures, concrete degradation.

**RESUMEN.** Los problemas relacionados con la durabilidad en las estructuras de hormigón se encuentran generalmente asociados a la severidad del medio que los rodea y al uso inapropiado de las relaciones agua/cemento en la preparación del material. Como resultado durante su vida útil, pueden sufrir diferentes deterioros. Uno de los cuales puede estar dado por la exposición a elevadas temperaturas. Con esta investigación, se presenta una parte de los resultados de las experiencias de laboratorio y trabajos de campo, que fueron reunidos durante el estudio de diagnóstico y deterioro realizado a la tienda *El Encanto* localizada en la provincia de Camagüey, Cuba, cuya estructura fue afectada por un incendio de gran intensidad en abril de 2008. En particular, solo se exponen los resultados de algunos de los ensayos practicados a los elementos estructurales de hormigón armado (losas de entrepiso y cubierta), a fin de determinar los distintos niveles de deterioro que presentaba este material y utilizar estos datos como referencia para el futuro desarrollo de técnicas que pudieran ser aplicadas en estructuras que hayan estado expuestas a condiciones similares. La extracción de testigos de hormigón para la determinación de la resistencia a la compresión, así como de otros indicadores físicos-químicos del material son algunos de los ensayos que en este trabajo, permitieron cuantificar el deterioro del hormigón de manera detallada para cada elemento estudiado. Se observaron notorios descensos en algunas de las propiedades del hormigón armado, los cuales permiten realizar su evaluación y análisis.

**ABSTRACT.** Durability problems of ordinary concrete can be associated generally with the severity of the environment and the use of inappropriate water/cement ratios in the confection of material. As a result along the time, these structures can make suffer different pathologies; one of them is the exposition to elevate temperatures. In this investigation, are exposed part of the laboratory and field experiences, obtained during the diagnosis and pathology studies carried out for *El Encanto* store in Camagüey Province, Cuba. His structure was affected by a great intensity fire in April 2008. In particular, only are exposed the results obtained in some of the test carried out in reinforced concrete structural elements (slabs and cover) in order to determine the different levels of deterioration that suffer the concrete of those elements, and to employ in the future these results like a reference for the develop of techniques that could be apply in structures which was exposed to similar temperatures. Concrete core extraction, to obtain the compression strength and other physical and chemistry parameters, are tests in this work, allow quantify the concrete deterioration in detailed way for each studied element, watching interesting deterioration of some characteristic of the reinforced concrete that permit his evaluation and test.

## INTRODUCCIÓN

El fuego como manifestación energética, es útil al hombre en sus actividades individuales y colectivas. Su dominio, constituyó el mayor avance para el hombre y su empleo dio lugar a gran parte de las actividades industriales a todo lo largo de la historia, sin embargo, puede tener un potencial de destrucción para los seres humanos cuando no es controlado adecuadamente y se convierte en un incendio. El cambio de los materiales de construcción ante los incendios es uno de los temas que más interés ha despertado en los últimos años en la comunidad científica en el campo de la ingeniería civil. Sin embargo, ha sido un tema poco estudiado y por

consiguiente de escaso dominio por parte del gremio de ingenieros civiles<sup>1</sup>.

Los efectos de la temperatura en las estructuras de hormigón armado empiezan con los propios cambios en la naturaleza de los materiales según su estructura. El hormigón pierde menos capacidad portante a elevadas temperaturas que el acero.<sup>2</sup> A diferencia del acero, el hormigón se expone directamente al fuego, por tanto las respectivas evaluaciones son más complejas. Además de las variables propias de cada incendio (carga de combustible, geometría del lugar, aereación, etc.), la variación en las propiedades del hormigón puede deberse a una serie de factores intrínsecos tales como la

densidad, la porosidad, el tipo de árido<sup>3</sup>, empleado en su preparación el método de vibración utilizado durante su aplicación y su enfriamiento.<sup>2,4-6</sup> En la microestructura<sup>7</sup> del hormigón se presentan fisuras y otras imperfecciones, que en muchos de los casos, se extienden hasta la macroestructura<sup>8</sup>. Cuando el material se somete a elevadas temperaturas, debido a su composición heterogénea, (cemento, árido, agua y aditivos) y a que sus componentes poseen diferentes coeficientes de dilatación térmica, se generan diferentes cambios volumétricos, que incrementan en él las micro y macrofisuras.<sup>9-11</sup> Por otra parte, a medida que el agua en su interior se convierte en vapor<sup>6,12</sup> y debido a la densa estructura del hormigón, este vapor no puede escapar eficientemente a través de su matriz porosa por lo que la presión en su interior aumenta.<sup>13-16</sup>

Cuando la presión en el hormigón resulta superior a su resistencia, comienza el proceso de desprendimiento parcial (Spalling).<sup>10,15-22</sup> Estos desprendimientos dejan al descubierto el hormigón "fresco", el cual queda expuesto a un calor intenso, condición que provoca una aceleración del fenómeno (Spalling) al punto de dejar al descubierto el acero de refuerzo del hormigón.<sup>7,18</sup> Este fenómeno tiene lugar rápidamente a los 100-150 °C como resultado del impacto térmico y el cambio de estado del agua intersticial.<sup>8,23</sup>

Entre los 200 y 300 °C, la pérdida del agua capilar es completa<sup>24</sup> sin que se aprecie aún alteración en la estructura del cemento hidratado, adquiriendo el hormigón un color rosáceo<sup>25-27</sup> debido a la ausencia del agua de las sales de hierro presentes en los áridos<sup>8</sup>, y sin que la resistencia mecánica del hormigón y el acero disminuyan en menos de un 10 %. De 300 a 400 °C, se produce la pérdida de agua del gel del cemento y tiene lugar una apreciable disminución de la resistencia mecánica del hormigón (la cual puede llegar al 50 %). Aparecen en este caso, las primeras fisuras en el hormigón.<sup>8,11,28,29</sup> A los 450 °C, una parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos, se transforma en óxido de calcio,<sup>14</sup> y el acero de refuerzo experimenta un incremento acelerado en la disminución de la resistencia a la tracción del material, mientras que en el hormigón, por encima de 500 °C, continúa en mayor proporción la descomposición de los silicatos cálcicos hidratados de la pasta de cemento.<sup>9,11,14,30-32</sup> Hacia los 600 °C, los áridos se expanden fuertemente y con diferente intensidad dando lugar a tensiones internas que comienzan a disgregar el hormigón. Muchas veces estas expansiones se encuentran incrementadas por las transformaciones estructurales que ocurren en determinados áridos en función de su naturaleza geológica.<sup>3</sup>

En el caso de los áridos de tipo cuarzoso como el granito y el gneis, se fisuran por encima de los 500 °C como consecuencia de la acción producida por el aumento volumétrico que experimenta el cuarzo al cambiar su estructura cristalina con el calor;<sup>3</sup> los ígneos como el basalto no experimentan daños por la acción del calor; los ligeros naturales, debido a su estructura porosa y vítrea, se comportan muy bien frente a elevadas temperaturas; los ligeros artificiales, como las arcillas expandidas y pizarras dilatadas, presentan una reacción frente al fuego muy similar a la de los áridos ígneos debido a que las temperaturas a las que se han formado pueden ser más elevadas que las que

se alcanzan en un incendio.<sup>3,33</sup>

Los áridos calizos (predominantes en Cuba) junto con los ligeros son los menos afectados por el fuego<sup>3</sup> debido a su bajo coeficiente de dilatación térmica. Los calizos tienen también a su favor el hecho de que la reacción que se produce en la descomposición del carbonato cálcico a óxido de calcio es endotérmica y además, que el CO<sub>2</sub> formado crea una película aislante térmica que envuelve a estos áridos.<sup>3</sup> En este último intervalo de temperatura (300 a 600 °C), la resistencia a la compresión del hormigón disminuye en un 50 % y el módulo de elasticidad en un 80 %, su color experimenta un viraje de rosa a rojo.<sup>25-27</sup> Entre 600 y 950 °C, el color cambia de nuevo a gris con puntos rojizos, lo que representa un índice de friabilidad y de gran succión de agua. A esta última temperatura, la resistencia del hormigón es muy reducida. De 950 a 1 000 °C o antes, el color cambia a amarillo-anaranjado<sup>25-27,34</sup> y el hormigón empieza a sinterizarse (descomponerse) principalmente por la descomposición total de los silicatos cálcicos hidratados de la pasta de cemento.<sup>30</sup> Entre 1 000 y 1 200 °C, el hormigón se sinteriza completamente y su color se vuelve amarillo claro,<sup>25-27,35</sup> sus resistencias se vuelven totalmente nulas, lo que trae como consecuencia el fallo inminente del elemento estructural<sup>30</sup> a medida que disminuye la resistencia del hormigón y del acero.

Este trabajo, tuvo como objetivo presentar una parte de los resultados de en los ensayos llevados a cabo en diferentes zonas de una edificación que estuvo expuesta a elevadas temperaturas originadas por un incendio de gran intensidad con el objetivo de obtener una serie de datos que posibilitara determinar el estado de deterioro que presentara el material de los elementos estructurales y las posibles causas que originaron las diferentes lesiones y patologías encontradas en ellos lo cual permitirá caracterizar la influencia de estas en el hormigón armado y de manera general, el estado del edificio tras su exposición a elevadas temperaturas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Objeto de estudio

La estructura del inmueble estudiado correspondió a la década de los años 50 con dos plantas y estaba compuesta por elementos estructurales de diferentes materiales, como son las vigas y las columnas que constituyen perfiles metálicos de procedencia norteamericana. Otros elementos tales como, las losas de entrepiso y la cubierta eran de hormigón armado forradas en la superficie expuesta por una capa de lana de vidrio que sirve de protección ante elevadas temperaturas, y por último, la fachada que está constituida por muros de ladrillo en su mayoría. Cabe destacar que también presentaba un entramado de vigas de madera que soportaban el falso techo de los dos niveles.<sup>1</sup>

Las principales patologías observadas durante la inspección preliminar a la investigación fueron:

- Fisuras y grietas en elementos estructurales debido a los cambios volumétricos ocasionados por el aumento de la temperatura, así como en la junta entre ellos.
- Deformaciones del acero en perfiles metálicos debido a la acción de las elevadas temperaturas.
- Carbonización de la madera que soportaba el falso techo.

### Toma de muestra y ensayos realizados

La toma de muestras se realizó en diferentes elementos estructurales (losas principalmente) distribuidos por todo el edificio, de manera que correspondieran

a aquellas zonas donde el incendio tuvo la mayor y la menor intensidad, así como a zonas que no estuvieron expuestas a las elevadas temperaturas, con el objetivo

la máquina perforadora. Se utilizaron brocas de 10,4 cm de diámetro, de forma tal que se cumpliera con la relación mínima establecida entre el diámetro del núcleo de hor-

**Tabla 1.** Ensayos especiales normalizados realizados al hormigón

| Ensayo                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------|
| Determinación de la resistencia a compresión de. <sup>36,37</sup>            |
| Determinación de la porosidad. <sup>38</sup>                                 |
| Determinación de la profundidad de carbonatación. <sup>39</sup>              |
| Determinación de la concentración de iones cloruro. <sup>40</sup>            |
| Determinación de la resistividad. <sup>41</sup>                              |
| Determinación de los potenciales de corrosión. <sup>41</sup>                 |
| Determinación de la intensidad y la velocidad de la corrosión. <sup>41</sup> |

de obtener resultados estadísticamente representativos de cada nivel de deterioro del material para proceder a su comparación mediante ensayos especiales normalizados (Tabla 1).<sup>36-41</sup>

### Equipamiento empleado

- Profometer 5 y sondas de detección de metales (Proceq, Suiza).
- Extractora de testigos (Hilti, Liechtenstein, Alemania).
- Taladro rotatorio (Hilti, Liechtenstein, Alemania).
- Martillo percutor (Hilti, Liechtenstein, Alemania).
- Resistivímetro D-4PRA (USA).
- Gecor 8 (James Instrument, USA).<sup>1</sup>
- Corrosímetro Cormap (James Instruments, USA).<sup>1</sup>
- Pie de rey. Precisión de 0,01 mm.
- Cinta métrica, herramientas y accesorios.
- Equipamiento de laboratorio químico, reactivos y cristalería.
- Otras herramientas y accesorios.

<sup>1</sup> Se utilizó un electrodo de cobre como electrodo de referencia (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

El procedimiento *empleado* en la realización de cada uno de los ensayos, se llevó a cabo de manera que permitiera demostrar las causas cuantificables que originaron el deterioro del hormigón y dependió en gran medida de la propiedad a investigar, ya fuera física, mecánica o química. Los procedimientos utilizados para este fin se resumen a continuación.

## PARTE EXPERIMENTAL

### Zonas de estudio

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el presente estudio, se basó primeramente en determinar los lugares de la edificación donde el incendio tuvo la mayor y la menor intensidad. Seguido a esto, se seleccionaron ocho zonas de estudio para extraer muestras de hormigón, cuya distribución fue la siguiente:

Zonas de menor intensidad del incendio: 1, 3, 4 y 7

Zonas de mayor intensidad del incendio: 5, 6 y 8

Zona libre de afectación ante las elevadas temperaturas: 2

### Resistencia a la compresión del hormigón

Esta propiedad se determinó a partir de la extracción y rotura bajo compresión de testigos de hormigón. Obtenidos de cada zona seleccionada mediante perforación con



**Fig. 1.** Testigo de hormigón junto con relleno y losa de piso.

la máquina perforadora. Se utilizaron brocas de 10,4 cm de diámetro, de forma tal que se cumpliera con la relación mínima establecida entre el diámetro del núcleo de hormigón y el tamaño máximo del árido grueso empleado en la elaboración del material. Los testigos se cortaron con respecto a la esbeltez (una altura de dos veces el diámetro del testigo) y recibieron el tratamiento establecido según las normas cubanas vigentes<sup>37</sup> (Fig. 1).

### Porosidad del hormigón

El procedimiento utilizado para determinar esta propiedad se basó en la utilización de testigos de hormigón de los elementos objeto de estudio. La extracción de estos se realizó de forma similar a la referida anteriormente para la resistencia a la compresión del hormigón. Se mantuvo el mismo diámetro de la broca (10,4 cm), pero no la esbeltez, ya que para el caso de la porosidad, la muestra solo debe poseer no más de 3 cm de espesor. Una vez preparada la muestra en el laboratorio (espesor de 2,5 cm), se aplicó el método de Goran Fagerlund, según norma cubana.<sup>38</sup>

### Profundidad de carbonatación

Esta propiedad se determinó directamente en el elemento estructural mediante el retiro del recubrimiento de hormigón para lo cual se utilizó un martillo percutor de impacto mecánico, y un indicador ácido-base (fenolftaleína) para determinar de manera aproximada el pH del hormigón. Las mediciones de la profundidad de carbonatación (cambio de coloración), se realizaron antes de los 15 min. Se midieron profundidades máximas y mínimas que permitieran obtener una media aritmética representativa de la profundidad carbonatación en la zona de estudio.

### Concentración de iones cloruro en el hormigón con respecto a su masa

Las muestras fueron obtenidas mediante la perforación de la masa de hormigón con un taladro percutor hasta el acero de refuerzo del elemento estructural<sup>41</sup> y posteriormente, fueron enviadas al laboratorio para la determinación de la concentración total de iones cloruro.<sup>40</sup>

### Resistividad eléctrica del hormigón

Las mediciones realizadas para este ensayo fueron ejecutadas mediante un medidor de resistividad. El

resistímetro empleado en este estudio, constituye un instrumento que posee cuatro sondas separadas a 5 cm cada una cuyo funcionamiento está basado en el método de Wenner<sup>41</sup>. Está diseñado para la rápida medición de la resistividad eléctrica aparente del hormigón. Su mecanismo principal de funcionamiento radica en pasar una corriente alterna de magnitud constante a una frecuencia de 330 Hz a través del par exterior de sensores, y medir el voltaje de forma localizada entre el par interior. Una vez que los sensores del instrumento están listos para la medición, se colocan directamente sobre la superficie del hormigón. Antes del contacto con el equipo, esta se humedece apropiadamente<sup>41</sup> se realizan quince mediciones como mínimo en cada zona de estudio.

### Potenciales de corrosión

Para realizar este ensayo, se determinó la posición del acero de refuerzo dentro del hormigón y a continuación, se perforó este para tener libre acceso a las barras de acero necesarias para la ejecución del ensayo. Se limpió la superficie del acero expuesta y se trazaron sobre la superficie del hormigón cuadrículas múltiples con espaciamiento uniforme de 20,0 cm. Posteriormente, se tomó el Corrosímetro, se conectó el electrodo de referencia al positivo del voltímetro y el negativo al acero de refuerzo,<sup>41</sup> y finalmente, se realizó la medición del potencial.

### Intensidad y velocidad de corrosión

La intensidad y la velocidad de la corrosión se determinaron mediante el GECOR8. Este equipo incluye una avanzada técnica de confinamiento modulado para medir la velocidad de corrosión en el hormigón armado por la técnica de resistencia a la polarización<sup>42</sup> en mediciones *in-situ*. Para su ejecución se aprovecharon las perforaciones realizadas para los ensayos anteriores, a fin de poder hacer contacto con la armadura de refuerzo y situar el sensor<sup>41</sup> sobre la superficie del hormigón a través de una esponja húmeda. La intensidad y la velocidad de corrosión fueron obtenidas a partir de la una media aritmética de un conjunto de mediciones en cada zona de estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades físico-químicas y mecánicas del hormigón

#### Resistencia a la compresión del hormigón

Este ensayo a compresión arroja resultados que se corresponden con la tensión máxima a compresión axial (resistencia a compresión) que es capaz de soportar el núcleo ensayado.<sup>36</sup> Este indicador experimenta una disminución de la resistencia a compresión en aquellas zonas donde el incendio tuvo mayor intensidad (Tabla 2). Estos resultados permiten evaluar los distintos niveles de degradación y el deterioro experimentado por el hormigón bajo la acción de elevadas temperaturas.<sup>1</sup>

El hormigón experimentó un descenso de su resistencia a la compresión en función de la temperatura en aquellos puntos donde se extrajo el testigo. En las zonas donde el fuego alcanzó su mayor intensidad,<sup>5,6,8</sup> el hormigón redujo su resistencia en un 50 % aproximadamente en comparación con la zona que no experimentó afectación por aquel. Este descenso de su resistencia corresponde generalmente a un hormigón expuesto a una temperatura<sup>43</sup> entre 500 y 600 °C. Sin embargo, en las zonas donde el incendio alcanzó la menor intensidad la resistencia del hormigón solo disminuyó un 20 %. Este descenso de resistencia corresponde a un hormigón expuesto a temperaturas entre 300 y 400 °C (zona 2).<sup>43</sup>

La resistencia del hormigón es una propiedad mecánica que depende de las características físico-químicas de los materiales que lo componen (cemento, agua y áridos en su mayor proporción). Desde el punto de vista químico (en la pasta del cemento) los silicatos tricálcicos y dicálcicos son los encargados de aportar al hormigón su resistencia a la compresión, sin embargo, cuando estos compuestos hidratados son expuestos al fuego, se descomponen<sup>9,11,14,31,32</sup> en función de la temperatura alcanzada con lo que se afecta la resistencia a la compresión del hormigón así como, la adherencia en la interfase árido-pasta de cemento.

Es importante señalar que el falso techo de la estructura estaba soportado por un reticulado de vigas de madera en él cual se carbonizó casi totalmente la sección transversal del elemento, factor que contribuyó a incrementar la temperatura y la emisión de CO<sub>2</sub> en puntos cercanos a la superficie del hormigón.

### Porosidad del hormigón

La porosidad total encontrada en el hormigón osciló entre 12 y 14,5 % Porosidad determinada en el hormigón de los testigos ensayados correspondientes a las diferentes zonas estudiadas (Tabla 3).

Según la literatura internacional los porcentajes superiores al 15 % son indicativos de hormigones porosos, permeables e incapaces de proteger al acero de refuerzo ante la acción de los agentes agresivos del medio, ni de garantizar la durabilidad<sup>44</sup> de los elementos del hormigón armado,<sup>41</sup> sin una adecuada protección.

Por otro lado, la porosidad promedio obtenida, no

**Tabla 3.** Porosidad determinada en el hormigón de los testigos ensayados correspondientes a las diferentes zonas estudiadas

| Zona          | Intensidad | Porosidad (%) |
|---------------|------------|---------------|
| 1 - 3 - 4 - 7 | Menor      | 13 - 15       |
| 5 - 6 - 8     | Mayor      | 12 - 14       |
| 2             | Ninguna    | 14 - 15       |

**Tabla 2.** Resistencia a la compresión de los testigos ensayados correspondientes a las diferentes zonas estudiadas

| Zona          | Intensidad y afectación del incendio | Resistencia a la compresión (MPa) | Porosidad (%) |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1 - 3 - 4 - 7 | Menor                                | 24 - 27                           | 14,5          |
| 5 - 6 - 8     | Mayor                                | 15 - 17                           | 12,5          |
| 2             | Ninguna                              | 30 - 33                           | 14,0          |

varió significativamente en función del nivel de exposición a las elevadas temperaturas que experimentó el hormigón, aunque en ninguno de los casos, sobrepasó el 15%.<sup>1</sup> No obstante, es válido aclarar que el hormigón poseía una capa de lana de vidrio que le aportó determinada protección del calor del incendio.

### Profundidad de carbonatación

Se denomina carbonatación, al proceso en el que el dióxido de carbono reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del hormigón y da lugar a la neutralización de todo el material. Esto produce un cambio abrupto de pH en el interior del hormigón que da lugar a la aparición de un frente carbonatado, que se revela muy bien con fenolftaleína. Cuando este frente llega hasta la armadura, esta se despasiva de manera generalizada como consecuencia de la disminución del pH en el hormigón y pierde de esta forma, la capa pasiva que se mantenía constante y estable en un ambiente con pH mayor que 10.<sup>45</sup> La velocidad de avance de este frente de carbonatación está en función fundamentalmente de su porosidad así como del contenido de humedad y de la materia alcalina carbonatable en el hormigón.

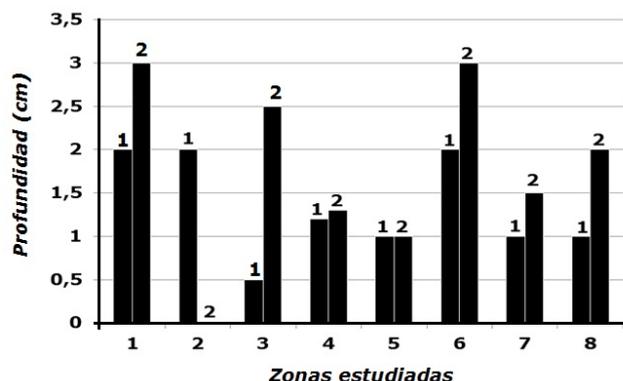


Fig. 2. Profundidad de carbonatación encontrada en el hormigón. 1 Espesor de recubrimiento. 2 Profundidad de carbonatación.

No obstante, el mecanismo de carbonatación en este caso, ocurre de manera diferente al tradicional explicado anteriormente, ya que este proceso como consecuencia del CO<sub>2</sub> del ambiente, ocurre a humedades relativas de 60 y 75 % aproximadamente, las que no fueron alcanzables en el interior del incendio debido a las elevadas temperaturas que condicionaban una humedad relativa mínima (Fig. 2).

En casi la totalidad de las zonas investigadas el hormigón que rodeaba a las barras del acero de refuerzo se encontraba carbonatado, excepto en la Zona 2 que no experimentó exposición representativa a las elevadas temperaturas, debido a la existencia y permanencia de la lana de vidrio que protegía la superficie del hormigón durante el incendio, por lo que es posible afirmar que el nivel de carbonatación de esta zona fue similar al existente antes del incendio. Esto provoca (excepto en la Zona 2) un ambiente propicio para el desarrollo de la corrosión del acero de refuerzo en el hormigón. Se pudieron observar distintas profundidades de carbonatación en zonas con diferentes niveles de exposición al fuego. En las zonas de menor intensidad del incendio, el hormigón que rodeaba al acero de refuerzo no se encontró

carbonatado (al menos no a esa profundidad) (Fig. 3 a). En cambio, en las zonas de mayor intensidad del fuego la imagen (Fig. 3 b) se observó claramente cómo la carbonatación alcanzó el acero de refuerzo.

### Concentración de iones cloruro en la masa del hormigón

Los iones cloruro provocan una destrucción localizada de la capa pasiva, daño que da lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos. Estos iones pueden encontrarse en la masa de hormigón por dos causas fundamentales: porque los contengan las materias primas (agua, áridos, adiciones, etc.), o porque penetren desde el exterior con el aerosol marino.

En casi todas las muestras de hormigón ensayadas (excepto en las correspondientes a las zonas 3 y 5) la



(a)



(b)

Fig. 3. a) La carbonatación no llega al acero de refuerzo. b) La carbonatación alcanza el acero de refuerzo.

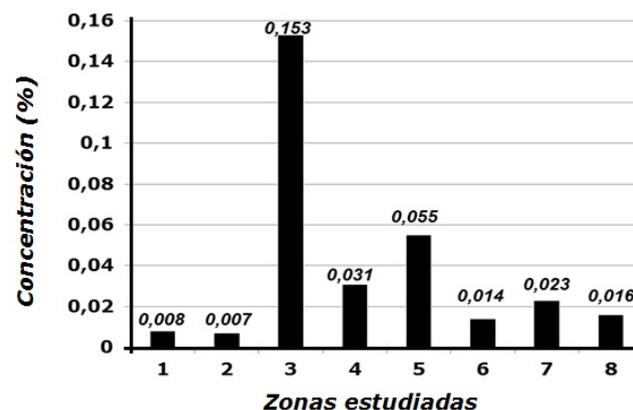


Fig. 4. Concentración de iones cloruro en el hormigón de las diferentes zonas seleccionadas en la edificación objeto de estudio.

concentración de iones cloruro no fue suficiente para provocar la corrosión localizada del acero de refuerzo, ya que para que esto ocurra, debe ser igual o superior a 0,05 % con respecto a la masa del hormigón<sup>41</sup> (Fig.4). Las concentraciones encontradas son representativas de una estructura que se encuentra situada en un ambiente donde la agresividad corrosiva es muy baja y no existen prácticamente agentes agresivos que contengan iones cloruro.

La edificación se encuentra localizada en la ciudad de Camagüey, a unos 52,5 km. de la costa norte de Cuba, prácticamente en el centro de la Isla entre las dos costas, norte y sur, por lo que la acción del aerosol marino a esa distancia es casi nula por lo que no debe afectar el hormigón, como consecuencia de esa condición la humedad relativa en ese lugar resulta prácticamente baja en comparación con las zonas próximas al litoral norte de la Isla. Por otro lado su posición dentro del casco histórico de la ciudad, evita que otros agentes contaminantes y agresivos como el CO<sub>2</sub> y los iones sulfato afecten de manera considerable el hormigón, ya que dentro de esta zona se prohíbe el paso de vehículos automotores y no existen industrias contaminantes, lo cual contribuye a evitar que todos esos agentes (iones cloruro, sulfato, así como CO<sub>2</sub>) de manera general aceleren el proceso de deterioro del hormigón armado.

**Propiedades electroquímicas del hormigón armado**

**Resistividad eléctrica del hormigón**

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad. En el caso del hormigón, depende en gran medida del grado de saturación de sus poros y en menor grado de la hidratación de la pasta de cemento, así como, de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. La conductividad eléctrica del hormigón está basada en un proceso electrolítico, el cual tiene lugar por el movimiento iónico de la disolución acuosa de la matriz del cemento. Esto determina que un hormigón muy permeable, tenga una gran conductividad y baja resistencia al paso de la corriente eléctrica. En el caso estudiado, el hormigón que conformaba los elementos estructurales no presentaba una gran porosidad y como consecuencia de la ubicación geográfica de la estructura y las elevadas temperaturas a que fueron sometidos sus elementos, la humedad relativa era muy baja, así como la concentración de iones cloruro en el interior de la masa del material por lo que no existían condiciones favorables que permitieran el paso de la corriente eléctrica mediante el movimiento iónico a través del hormigón.

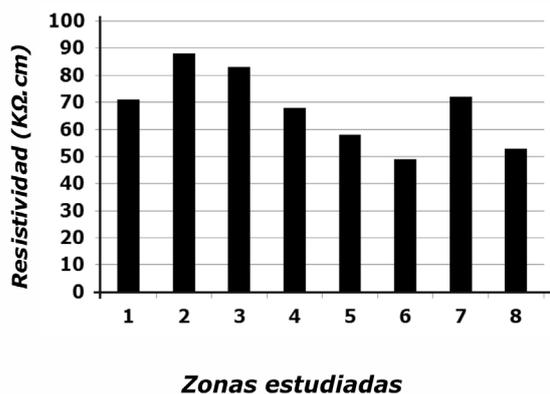
Es importante señalar que no se encontró una relación proporcional entre la resistividad y los diferentes niveles de temperatura alcanzados durante el incendio. Las zonas que estuvieron expuestas a una menor intensidad del incendio (1, 3, 4 y 7) presentaron una resistividad mayor que las zonas que fueron expuestas a una mayor intensidad de aquel (5, 6 y 8) (Fig. 5). No obstante, los resultados del ensayo *in situ*, proporcionaron una medida de la posible velocidad de corrosión del acero que se encontraba dentro del hormigón. Los valores de resistividad determinados en el ensayo se situaron en un intervalo mayor que 10 kΩ.cm y menor que 200 kΩ.cm, lo que sugiere un riesgo de corrosión moderado

**Potenciales de corrosión**

Los resultados correspondientes la medición de los potenciales estacionarios de corrosión del acero de refuerzo se analizaron a través de los criterios de valoración propuestos por CYTED-Red Durar<sup>41</sup>, que establecen que en los casos en que el hormigón esté carbonatado, haya presencia de oxígeno y la humedad relativa sea elevada. Potenciales en el intervalo de -150 a -600 mV medidos con el electrodo de cobre/sulfato de cobre, implican riesgos de daño por corrosión uniforme o generalizada que se clasifican de moderados a altos. Y para el caso de la acción de iones cloruro, en presencia de oxígeno y elevada humedad relativa, potenciales en el intervalo entre -200 y 600 mV implican un riesgo de daño por corrosión localizada que se clasifica de alto.

En la edificación objeto de estudio, la profundidad de carbonatación superó o alcanzó al acero de refuerzo en la mayoría de las zonas investigadas (excepto en la 2) y en casi todos los casos, la concentración de iones cloruro vs. masa de hormigón no excedió el umbral de 0,05 %, excepto en las zonas 3 y 5 donde la concentración de los iones cloruro, excedió este valor (0,05 %). Del análisis de estos resultados puede asumirse un criterio conjunto que tome como base el umbral de potenciales inferiores a -150 mV, que implican riesgo de daño por corrosión uniforme o generalizada y el de potenciales entre -200 y -600 mV. que implican un alto riesgo de daño por corrosión localizada.

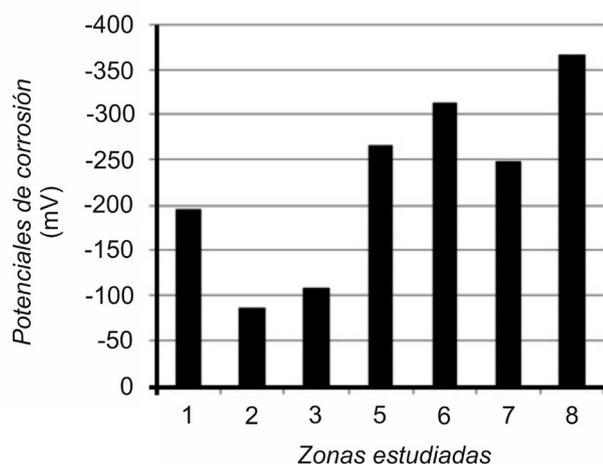
Se pudo observar que a las zonas que presentaron la mayor exposición a elevadas temperaturas, correspondieron los potenciales de corrosión entre 250 y 400 mV (Fig. 6) similar a los potenciales obtenidos para la zona de menor exposición. Sin embargo, en comparación con la zona que no experimentó la acción de elevadas temperaturas, sí se encontraron diferencias notables, ya que los potenciales obtenidos en este caso, se ubicaron en un promedio de -85 mV, lo cual se puede atribuir a la corrosión química



Criterios de evaluación<sup>41</sup>

| Resistividad (kΩ.cm) | Riesgo de corrosión |
|----------------------|---------------------|
| > 200                | Poco                |
| y 10 – 200           | Moderado            |
| < 10                 | Alto                |

Fig. 5. Valores promedio de resistividad eléctrica determinadas para cada zona de estudio.



**Fig. 6.** Potenciales de corrosión promedio. Zonas 5, 6 y 8: Mayor intensidad del incendio. Zonas 1, 3 y 7: Menor intensidad del incendio. Zona 2: Ninguna exposición al incendio. Nota: No se realizaron mediciones en la zona 4.

que sufrió el acero como consecuencia de la reacción del oxígeno con el metal a elevadas temperaturas, ya que el propio metal puede disolver este gas formando una disolución sólida de oxígeno en la superficie del metal o formando una capa de óxidos, que incrementa en espesor a medida que aumenta la temperatura, elevación de la temperatura que pudiera fungir como un catalizador debido a la presencia de  $\text{CO}_2$  en conjunto con el  $\text{O}_2$ .

#### Análisis de la velocidad de corrosión

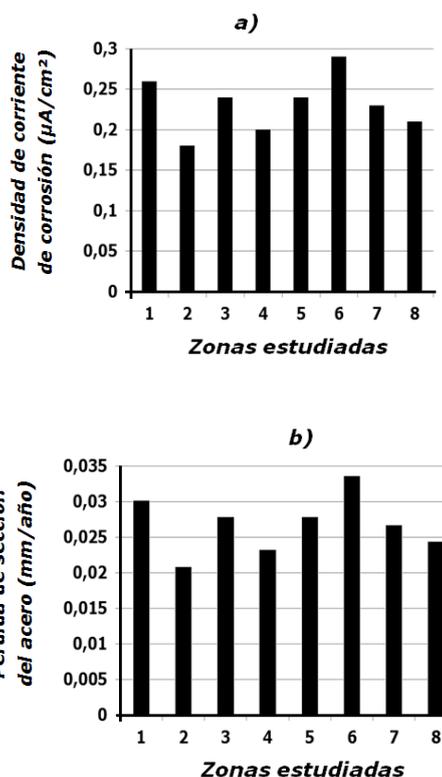
La velocidad o densidad de corriente de corrosión está dada por la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Se expresa de forma usual a partir de medidas electroquímicas es en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y depende en mayor medida del grado de humedad del hormigón y la temperatura.

Después de elevar la densidad de corrosión en todas las zonas estudiadas, se pudo observar que el hormigón de manera general, presentó un nivel de corrosión moderado debido a la influencia de las elevadas temperaturas sobre la superficie de los elementos estructurales de hormigón armado, aunque similar a los resultados relacionados con la resistividad. Se pudo advertir que no existe una correspondencia entre las velocidades elevadas de corrosión y las zonas de mayor intensidad del incendio, tal es así, que en la zona 5 (zona de mayor intensidad del incendio) se encontró una velocidad de corrosión menor que en la zona de estudio 1, donde el incendio alcanzó una menor intensidad en comparación con la 5 (Fig. 7).

El nivel de corrosión moderado referido se ha especificado en términos de vida útil (intervalo de 0,1 a  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), según lo establecido por la RED DURAR<sup>41</sup> ya que magnitudes de densidad de corriente de corrosión que se encuentren cercanas a los  $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , son características de aceros en los que se forman óxidos expansivos a largo plazo, los cuales afectan al hormigón con el desarrollo de grietas y fisuras al cabo de los 15 a 20 años de explotación aproximadamente.<sup>23</sup>

#### CONCLUSIONES

Se logró constatar que los factores fundamentales que generaron un descenso de la resistencia a la compresión del hormigón constitutivo de los elementos estructurales de la edificación estudiada fueron las ele-



**Fig. 7.** a) Densidad de corriente de corrosión del acero en el hormigón. b) Velocidad de la corrosión expresada en pérdida de sección (mm) de la barra de acero por año.

vadas temperaturas que se alcanzaron en sus distintas zonas incluidas las alcanzadas cerca de la superficie del hormigón como consecuencia de la combustión de la madera que soportaba el falso techo y los conductos de ventilación compuestos en su mayoría por tableros de bagazo de caña.

Se determinó que en el caso del proceso de carbonatación del hormigón,<sup>45</sup> el factor principal que lo condicionó fue la existencia de un apropiado ambiente alrededor de las barras de refuerzo, dado por la gran cantidad de  $\text{CO}_2$  que se generó como consecuencia de la combustión de los diferentes objetos que se encontraban dentro de la edificación (madera, aceites, pinturas, tejidos, etc.) y además la elevada temperatura que se alcanzó en su interior. De esta manera, el proceso de carbonatación se vio favorecido al ocurrir a gran temperatura y elevada concentración de  $\text{CO}_2$  en lugar de manera habitual a temperatura y concentración de  $\text{CO}_2$  ambientales.

El proceso de corrosión en la mayoría de las zonas estudiadas de la edificación, se debió principalmente, al aumento de la temperatura en la masa del hormigón provocado por el incendio, a lo que se sumó una baja resistividad eléctrica, lo cual lo califica como un hormigón permeable y conductor de agentes agresivos al material con riesgo moderado de corrosión.

El conjunto de ensayos realizados en el presente estudio pudieran constituir una apropiada metodología de trabajo para caracterizar el posible grado de deterioro del hormigón que presenten los diferentes elementos estructurales de una edificación y el estado en que se pueda encontrar esta tras su exposición a elevadas temperaturas como las que suelen acompañar a un incendio de gran proporción y pudieran contribuir al desarrollo de nuevas técnicas aplicables con ese fin, así constituir una apropiada base para realizar estudios de diagnósticos similares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Chiu Rodríguez, YC. Estudio sobre los métodos empleados por el American Concrete Institute y el Comité Europeo de Normalización para determinar el comportamiento de las estructuras de hormigón armado en caso de incendio. [Tesis de diploma], Ciudad de La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Julio de 2008.
- Biolzi L, Cattaneo S, Rosati G. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2008;30:907-916.
- Xing Z, Beaucour AL, Hebert R, Noumowe A, Ledesert B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. *Cement and Concrete Research*. 2011;41:392-402.
- Peng GF, Bian SH, Guo ZQ, Zhao J, Peng XL, Jiang YC. Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2008;22:948-955.
- Tanacan L, Yasa Ersoy H, Arpacioğlu V. Effect of high temperature and cooling conditions on aerated concrete properties. *Revista Construction and Building Materials*. 2009; 23: 1240-1248.
- Vieira JPB, Correia JR, Brito J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2011;41:533-541.
- Peng GF, Huang ZS. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2008;22:593-599.
- Georgali B, Tsakiridis PE. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement & Concrete Composites*. 2005;27:255-259.
- Arioz O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*. 2007;42:516-522.
- Zheng WZ, Hou XM, Shi DS, Xu MX. Experimental study on concrete spalling in prestressed slabs subjected to fire. *Fire Safety Journal*. 2010;45:283-297.
- Chen B, Li CH, Chen L. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age. *Fire Safety Journal*. 2009;44:997-1002.
- Yuksel I, Siddique R, Ozkan O. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*. 2011;25:967-972.
- Ghan YN, Peng GF, Anson M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 1999;21:23-27.
- Uysal M Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2012;26:701-706.
- Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2000;30:1915-1927.
- Dwaikat MB, Kodur VKR. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. *Fire Safety Journal*. 2009;44:425-434.
- Sullivan PJE. A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature. *Cement & Concrete Composites*. 2004;26:155-162.
- Mindeguia JC, Pimienta P, Noumowé A, Kanema M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research*. 2010;40:477-487.
- Heijden GHA, Bijnen RMW, Pel L, Huinink HP. Moisture transport in heated concrete, as studied by NMR, and its consequences for fire spalling. *Cement and Concrete Research*. 2007;37:894-901.
- Zeiml M, Lackner R, Leithner D, Eberhardsteiner J. Identification of residual gas-transport properties of concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2008;38:699-716.
- Ali F, Nadjai A, Silcock G, Abu-Tair A. Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns. *Fire Safety Journal*. 2004;39:433-445.
- Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*. 2003;38:103-116.
- Fundoug R. Efectos de incendios en estructuras de hormigón armado. [Consultado 25 de octubre de 2009]. Disponible en <http://www.construmatica.com>.
- Felicetti R. The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2006;28:321-329.
- Annerel E, Taerwe L. Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire. *Construction and Building Materials*. 2011;25:3989-3997.
- ShortU NR, Purkiss JA, Guise SE. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Construction and Building Materials*. 2001;15:9-15.
- Yu'zer N, Ako'z F, O' ztu'rk LD. Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1803-1807.
- Petkovski M. Effects of stress during heating on strength and stiffness of concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Research*. 2010;40:1744-1755.
- Zhang B. Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures. *Fire Safety Journal*. 2011;46:543-549.
- Haddad RH, Shannis LG. Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel. *Construction and Building Materials*. 2004;18:425-435.
- Othuman MA, Wang YC. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25:705-716.
- Colombo M, Felicetti R. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. *Fire Safety Journal*. 2007;42:461-472.
- UNE EN 1363-1:2000: Ensayos de Resistencia al Fuego. Requisitos Generales. AENOR, Madrid, España.
- Annerel E, Taerwe L. Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis. *Cement and Concrete Research*. 2009;39:1239-1249.
- Cioni P, Croce P, Salvatore W. Assessing "re damage to r.c. elements. *Fire Safety Journal*. 2001;36:181-199.
- NC 244:05 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas.
- NC 318:03 Hormigón endurecido. Extracción y preparación de testigos cilíndricos.
- NC 345:2005. Hormigón. Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- NC 355:2004. Hormigón. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en uso.
- NC 344:2005. Hormigón endurecido. Determinación del perfil de penetración del perfil de iones cloruro.
- Uller L, Troconis de Rincon L, Alanis I, Helene P, Mejias de Gutiérrez R, O'Reilly V. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, RED DURAR, 1997.
- Castañeda A. Caracterización de la Corrosión en el acero de refuerzo del hormigón armado en presencia de cloruros. [Tesis en opción del título de Máster en Ciencia y Tecnología de Materiales]. Ciudad de La Habana, Universidad de La Habana; julio, 2007.
- Ministerio de Vivienda, Código Técnico de la Edificación, España; Marzo 2006.
- Aitcin PC. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*. 2003;25:409-420.
- Galvele JR, Duffó GS, (editores). Degradación de Materiales – I. Corrosión. Capítulo 15, 2003.